# ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
# TECHNOSPHERE SAFETY

УДК 622.8
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-1-58-72

Научная статья

## Определение содержания серы в минеральной массе для прогноза опасных свойств угольных шахтопластов

**Н.В. Пронская** [1], **Э.Н. Филатьева** [2], **М.В. Филатьев** [2], **Н.В. Шашло** [3] ✉
[1] Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Российская Федерация
[2] Луганский государственный университет имени Владимира Даля, г. Луганск, Российская Федерация
[3] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
✉ ninelllsss@gmail.com

EDN: WUYPWO

**Аннотация**

***Введение.*** Сера присутствует в органической и минеральной части всех видов твердого топлива, причем от ее содержания зависит проявление опасных свойств шахтопластов. В связи с этим не теряют актуальность научные изыскания, связанные с определением количества серы в ископаемом топливе. Содержание общей серы и ее разновидностей изучалось в большинстве случаев с позиций эффективности процессов переработки топлива, качества и экологической безопасности угольной продукции. Меньше внимания уделяли проявлению опасных свойств шахтопластов, прогнозированию и разработке профилактических мероприятий по предотвращению эндогенных пожаров в угольных шахтах. Цель представленной работы — создание инженерного метода расчетного определения элементного содержания серы в минеральной массе углей для прогноза опасных свойств шахтопластов.

***Материалы и методы.*** По результатам корреляционного анализа установили, каким образом содержание серы в горючей части топлива зависит от общей серы. Рассмотрели данные по углям практически всех шахтопластов Донецкого и Львовско-Волынского бассейнов. Представили соотношения зольности пластовых и обогащенных проб, а также сведения о содержании общей серы и серы в горючей части. Это позволило расчетным путем оценить содержание серы в минеральных примесях. Исходные данные для разработки метода взяли из справочно-нормативных документов.

***Результаты исследования.*** Рассмотрены семь совокупностей, которые включали от 149 до 1827 шахтопластов. По каждой обобщили справочные и расчетные данные:

– содержание серы — общей ($S_t^d$) и в горючей части топлива ($S_г$);

– условные точки для корректировки показателей во избежание получения отрицательных усредненных значений;

– эмпирические уравнения, которые описывают расчетные и скорректированные зависимости по соотношению $S_t^d$ и $S_г$;

– корреляцию этих показателей;

– диапазоны изменения выхода золы.

Все эти сведения представлены для обогащенных и не обогащенных углей, для выхода золы более и менее 10 %. В одном случае отмечены удовлетворительные результаты определения расчетного содержания серы в условно негорючей массе. Это совокупность из 149 шахтопластов. Для 13 из них разность показателей ($S_t^d$ – $S_г$) больше или равна нулю. Для 136 — меньше нуля. Для 81 содержание серы в условно негорючей части топлива $S_н$ меньше нуля. При этом отмечается достаточный уровень корреляции (0,79) и ограниченный диапазон изменения выхода золы (2,4–10). Соответствующее этой совокупности эмпирическое уравнение рекомендуется для прогноза опасных свойств шахтопластов с выходом золы менее 10 %.

***Обсуждение и заключение.*** Полученные результаты можно использовать для совершенствования нормативных документов по безопасному ведению горных работ с учетом содержания серы, как в органической массе, так и в минеральных примесях ископаемого угля.

**Ключевые слова:** сера в ископаемом угле, инженерный метод определения серы в минеральной массе угля, предотвращение эндогенных пожаров в угольных шахтах

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность редакционной коллегии журнала и рецензенту за профессиональный анализ и рекомендации по корректировке статьи.

**Для цитирования.** Пронская Н.В., Филатьева Э.Н., Филатьев М.В., Шашло Н.В. Определение содержания серы в минеральной массе для прогноза опасных свойств угольных шахтопластов. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2024;8(1):58–72. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-1-58-72

*Original article*

## Determination of Sulfur Content in Mineral Mass for Prediction of Hazardous Properties of Coal Mine Seams

**Natalya V. Pronskaya** [1], **Elvira N. Filatieva** [2], **Mikhail V. Filatiev** [2], **Nina V. Shashlo** [3] ✉
[1] Donbass State Technical University, Alchevsk, Russian Federation
[2] Lugansk Vladimir Dahl State University, Lugansk, Russian Federation
[3] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
✉ ninelllsss@gmail.com

**Abstract**
***Introduction.*** Sulfur is found in the organic and mineral parts of all types of solid fuels, and its concentration determines the extent of the hazardous characteristics of mine seams. Therefore, research on the determination of sulfur content in fossil fuels has not lost its relevance. The total sulfur content and its varieties has been studied in most cases in terms of the efficiency of fuel processing processes, the quality and environmental safety of coal products. Less attention was paid to the hazardous properties of mine seams, forecasting and developing preventive measures for endogenous fires in coal mines. This work aims to develop an engineering method to calculate the elemental sulfur content in the mineral mass of coal to predict the hazardous properties of mine seams.
***Materials and Methods.*** According to the results of the correlation analysis, we established how the sulfur content in the combustible part of the fuel depended on the total sulfur. We analyzed data on coals from almost all mine seams of the Donetsk and Lviv-Volyn coal basins. We presented the ash ratios for the formation and basin samples, as well as the information about the total sulfur and sulfur content in the combustible part. This allowed us to estimate the sulfur content in mineral impurities by calculation. The initial data for developing the method were taken from reference and regulatory documents.
***Results.*** Seven sets were considered, which included from 149 to 1827 mine seams. For each, reference and calculation data were summarized:
– sulfur content — total ($S_t^d$) and in the combustible part of the fuel ($S_г$);
– conditional points for adjusting the indicators to avoid obtaining negative average values;
– empirical equations that describe the calculated and corrected dependencies based on the ratio of $S_t^d$ and $S_г$;
– correlation of these indicators;
– ranges of change in ash yield.
All this information was presented for clean and raw coals, for ash yields of more and less than 10%. In one case, satisfactory results were noted for determining the calculated sulfur content in a conditionally non-combustible mass. This was a set of 149 mine layers. For 13 of them, the difference in indicators ($S_t^d – S_г$) was greater than or equal to zero. For 136 — less than zero. For 81, the sulfur content in the conditionally non-combustible part of the fuel $S_н$ was less than zero. At the same time, there was a sufficient level of correlation (0.79) and a limited range of changes in ash yield (2.4–10). The empirical equation corresponding to this set was recommended for predicting the hazardous properties of mine seams with an ash yield of less than 10%.
***Discussion and Conclusion.*** The results of this study can be used to improve regulations for the safe conduct of mining activities, taking into account sulfur content in organic matter and in mineral impurities of fossil coal.

**Keywords:** sulfur in fossil coal, engineering method for determining sulfur in the mineral mass of coal, prevention of endogenous fires in coal mines

**Acknowledgements.** The authors would like to thank the Editorial board and the reviewer for their professional analysis and recommendations for correcting the article.

**For citation.** Pronskaya NV, Filatieva EN, Filatiev MV, Shashlo NV. Determination of Sulfur Content in Mineral Mass for Prediction of Hazardous Properties of Coal Mine Seams. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2024;8(1):58–72. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-1-58-72

**Введение.** Сера — элемент соединений, входящих в органическую и минеральную часть любого топлива. В минеральной массе углей сера встречается главным образом в виде сульфатов (в основном кальция и железа) и дисульфидов железа $FeS_2$ (пирита и марказита), в органической массе — в виде органических соединений.

Различают несколько основных форм серы в углях. Это части общей серы:

– сульфатная $S_{SO_4}$ — входит в состав неорганической массы угля в виде сульфатов металлов;

– пиритная $S_p$ — входит в состав неорганической массы угля в виде дисульфидов металлов (пирита и марказита);

– органическая $S_o$ — входит в состав органических соединений.

Общую серу и ее разновидности, в отличие от серы золы, условно пересчитывают на элементную серу [1]:

$$S_t = S_{SO_4} + S_p + S_o\,. \qquad (1)$$

Содержание серы в золе принято рассчитывать в виде триоксида серы ($SO_3$). Сера — нежелательная и вредная часть топлива. При сжигании угля она выделяется в виде $SO_2$, загрязняет окружающую среду, вызывает коррозию металлических поверхностей, уменьшает теплоту сгорания топлива. При коксовании сера переходит в кокс, ухудшая его свойства и качество металла. По указанным причинам содержание общей серы и ее разновидностей изучалось в большинстве случаев с позиций эффективности процессов переработки топлива, качества и экологической безопасности угольной продукции. В этом направлении получены хорошие результаты, что подтверждается разработкой и успешным использованием современной промышленной классификации углей по генетическим и технологическим параметрам. В значительной степени она базируется на данных справочников, в которых по итогам экспериментов обобщалась информация о качестве каменных углей и антрацитов [2], а также об их обогатимости [3].

Менее значимы успехи в прогнозировании и разработке профилактических мероприятий по предотвращению эндогенных пожаров при ведении работ в угольных шахтах. Так, в течение двадцати лет (с 1994 по 2015 год), в шахтах Украины произошло более двухсот эндогенных пожаров [4]. Согласно открытым данным, аналогичные аварии происходят во многих угледобывающих странах. Таким образом, не решена проблема, актуальная с XIX века. Вначале она была связана с самовозгоранием угля на складах и при транспортировке, затем стали происходить аварии в угольных шахтах, обусловленные эндогенными пожарами [5].

Содержание серы в угле не только определяет его потребительские качества, но и существенно влияет на проявление опасных свойств шахтопластов при ведении горных работ [6]. В частности, при увеличении содержания в угле общей серы на 1–6 % вероятность эндогенного пожара возрастает более чем в три раза [7]. Были попытки разобраться, как по минеральным примесям можно выявить опасные свойства угольных шахтопластов [8]. Однако и сейчас почти не известно, каким образом исследуемые риски зависят от вида и формы серы в ископаемом угле. В результате в нормативных документах[1,2] вероятность эндогенных пожаров в шахтопластах определялась только содержанием общей серы[3].

Исследования [5] показали, что самовозгорание в значительной мере обусловлено природой не только угля, но и сопровождающих пород[4]. Крайне важно установить составную часть топлива, от которой зависит вероятность самовозгорания. Без этого лабораторные методы исследований не дают приемлемых ответов на поставленные вопросы. Предполагалось наряду с лабораторными исследованиями угольного вещества учитывать наличие в ископаемом топливе углистой породы из минеральных пропластков, а также из пород кровли и почвы. Для этого необходимо дополнительно рассматривать выход золы и содержание всех видов серы [5].

В руководстве по предупреждению и тушению эндогенных пожаров[5], как и в других нормативных документах по безопасному ведению горных работ, не принимается во внимание наличие минеральных примесей. Они не учитываются при борьбе с пылью в угольных шахтах, прогнозах газовыделения[6] и внезапных выбросов[7] и в целом в нормативных документах, регламентирующих горные работы.

[1] *Руководство по предупреждению и тушению эндогенных пожаров на угольных шахтах Украины.* КД 12.01.402-2000 от 18.12.2000. Донецк: Научно-исследовательский институт горноспасательного дела; 2000. 216 с.
[2] *Каталог углей СССР, склонных к самовозгоранию.* Москва: Недра; 1982. 416 с.
[3] *Руководство по предупреждению и тушению эндогенных пожаров на угольных шахтах Украины.* КД 12.01.402-2000. Донецк: НИИГД; 2000. 216 с.
[4] ГОСТ 25543-2013. *Угли бурые, каменные и антрациты. Классификация по генетическим и технологическим параметрам.* URL: https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293772/4293772639.pdf (дата обращения: 11.01.2023).
[5] *Руководство по предупреждению и тушению эндогенных пожаров на угольных шахтах Украины.* КД 12.01.402-2000 от 18.12.2000. Донецк: Научно-исследовательский институт горноспасательного дела; 2000. 216 с.
[6] *Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт.* Киев: Основа; 1994. 311 с.
[7] *Правила ведення гірничих робіт на пластах, схильних до газодинамічних явищ.* Стандарт Мінвуглепрому України № СОУ 10.1.00174088.011-2005. Київ: Мінвуглепром України; 2005. 224 с.

Содержание минеральных примесей, судя по выходу золы из пластовых проб угля [2] и [3], может значительно превышать 40 %. Это, несомненно, сказывается на достоверности прогноза опасных свойств шахтопластов при ведении горных работ и указывает на актуальность совершенствования нормативной базы. Для этого необходимо разработать инженерный метод определения серы в минеральной массе углей.

Цель представленной работы — доказать принципиальную и практически единственную возможность расчетного определения элементного содержания серы в минеральной массе углей для прогноза опасных свойств шахтопластов при ведении горных работ. Отметим, что при реализации данного подхода применяются некоторые стандартные показатели, зафиксированные в справочно-нормативной документации по потребительским качествам топлива для каждого шахтопласта. Речь идет об экспериментальных данных, касающихся содержания серы — общей и в горючей части топлива. Благодаря этим сведениям можно установить соотношения между содержанием серы в органической массе и минеральных примесях. По выходу золы можно определить соотношения между органической массой и минеральными примесями для обогащенных проб угля. Соотношение зольности пластовых и обогащенных проб дает возможность оценить содержание серы в удаляемых продуктах обогащения.

**Материалы и методы.** Методика проведения исследований основана на тесной корреляционной связи ($r = 0{,}93$) содержания серы в горючей части топлива ($S_г$) и обшей серы ($S_t^d$) для углей практически всех шахтопластов Донецкого и Львовско-Волынского бассейнов (рис. 1).

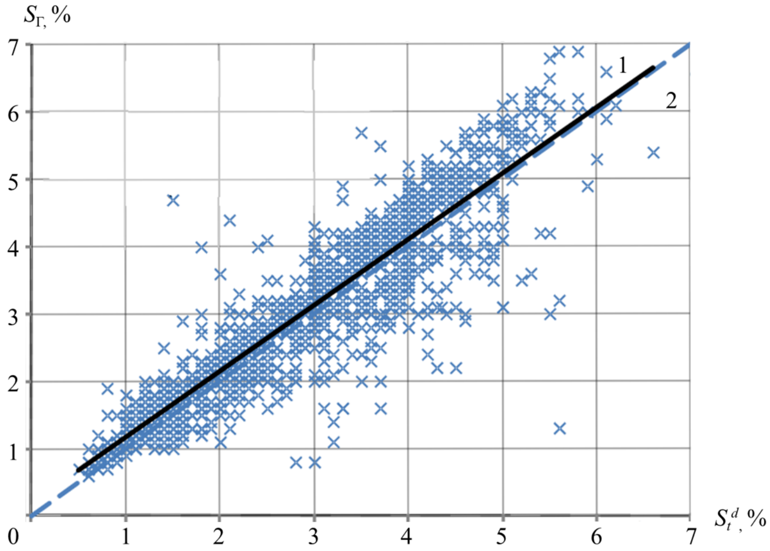



Рис. 1. Зависимость содержания серы в горючей части топлива ($S_г$) от общей серы ($S_t^d$) согласно статистической обработке экспериментальных данных: 1 — усредняющая прямая;
2 — биссектриса координатной сетки [2,3]

Статистическую обработку зависимости $S_г$ от $S_t^d$ выполнили для 1827 шахтопластов, по которым известно содержание серы — общей и в горючей части топлива.

В справочном нормативном документе [3] указаны общие сведения о потребительских качествах углей для 734 шахтопластов, а в справочнике [2] — для 1379.

Близость усредняющей прямой 1 и биссектрисы 2 координатной сетки (рис. 1) показывает, что в общем случае содержание серы в горючей части топлива ($S_г$) может быть выше и ниже значения общей серы ($S_t^d$). Разница между $S_t^d$ и $S_г$ ($S_t^d - S_г$) в первом приближении может быть критерием соотношения элементного содержания серы в горючей массе и в условно негорючей части топлива. Показатель ($S_t^d - S_г$) для 1315 шахтопластов был отрицательным, что указывает на преимущественное содержание серы в горючей части массы. Для 429 шахтопластов у этого показателя были положительные значения, что свидетельствует о преимущественном нахождении серы в условно негорючей части топлива. Нулевая разница ($S_t^d - S_г$) для 83 шахтопластов означала равенство содержания серы в горючей и условно негорючей частях углей для всей совокупности шахтопластов, рассматриваемых в статье.

Имеется информация для 2113 шахтопластов. По некоторым из них совпадают данные в разных документах, и это аргумент в пользу достоверности сведений. Для четырех шахтопластов не приведены значения выхода золы из пластовых проб (таблица 1). По этой причине можно анализировать экспериментальные данные о выходе золы для 2109 шахтопластов. Из них обогащение проводилось для 1622 шахтопластов, а для 487 не проводилось.

Таблица 1

Сведения о шахтопластах, для которых не приведены данные о выходе золы из пластовых проб

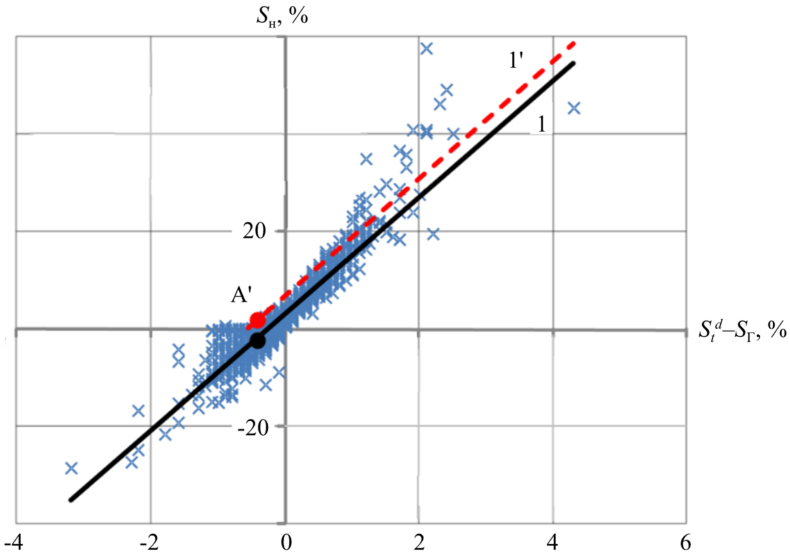
| Источник | Страница источника | Шахта | Индекс пласта | Зольность, % | | Содержание серы, % | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | пластовой пробы, $A_п^c$ | обогащенной пробы, $A_о^c$ | общей, $S_t^d$ | в горючей части, $S_г$ |
| [3] | 74 | № 144 | $l_1$ | – | 6,3 | 6,3 | 1,9 |
| | | | $k_8$ | – | 6,1 | 2,8 | 3,0 |
| | | 10-бис | $m_3$ | – | 7,0 | 3,2 | 3,5 |
| [4] | 106 | Им. Войкова | $l_2$ | – | – | – | – |

**Результаты исследования.** Показатели из [2] и [3] позволили рассчитать для 1827 шахтопластов содержание серы в условно негорючей части топлива $S_н$:

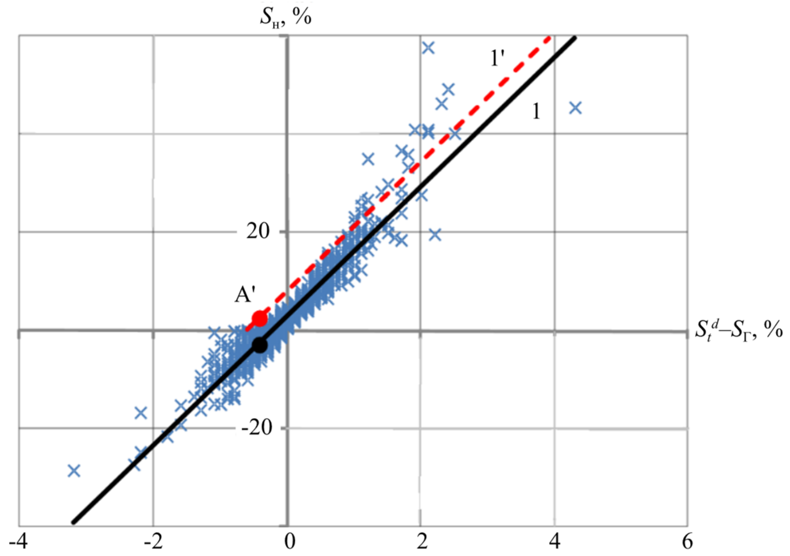
$$S_н = \frac{100 \cdot S_t^d - \left(100 - A_o^c\right) \cdot S_Г}{A_o^c}, \% \qquad (2)$$

где $A_о^c$ — выход золы из обогащенных проб, %.

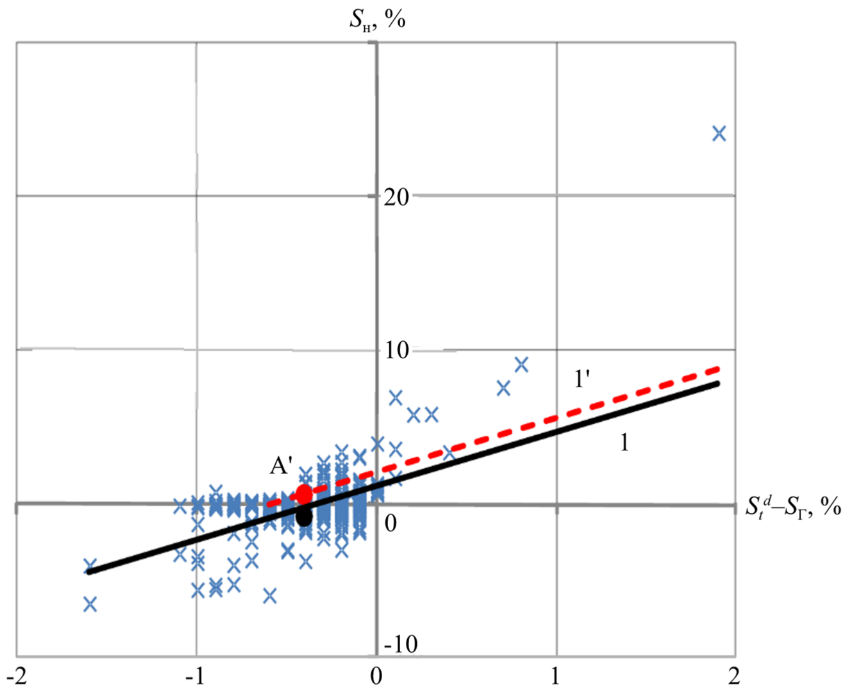
Расчетные значения $S_н$ связаны с показателем ($S_t^d$–$S_г$) тесной прямо пропорциональной корреляционной зависимостью ($r$ = 0,91, рис. 2 *а*).




*а*)




*б*)




*в*)

Рис. 2. Зависимость от критерия ($S_t^d - S_Г$) расчетных значений содержания серы ($S_н$) по уравнению (2) в условно негорючей части топлива: *а* — для всей совокупности из 1827 шахтопластов; *б* — для 1352 шахтопластов, угли которых предварительно обогащались; *в* — для 475 шахтопластов с необогащенными углями; 1 — усредняющие прямые; 1' — скорректированные положения усредняющих прямых; A' — условное нахождение точки для корректировки расположения прямой 1' и исключения получения отрицательных («диких») усредненных значений $S_н$; × — расчетные значения $S_н$ по уравнению (2) [3, 4]

Параллельно с этим получено значительное количество отрицательных расчетных значений $S_н$ для 802 шахтопластов. Тесная корреляция показателей и наличие «диких» (отрицательных) результатов свидетельствуют о возможном влиянии систематических погрешностей при определении разницы между содержанием серы общей ($S_t^d$) и в горючей части топлива ($S_Г$). Наличие отрицательных расчетных значений $S_н$ может указывать на то, что систематические погрешности определения критерия ($S_t^d - S_Г$) обусловлены как занижением экспериментальных значений общей серы, так и завышением в горючей части топлива.

Для раскрытия природы появления «диких» расчетных значений содержания серы в условно негорючей части топлива по уравнению (2) рассмотрели методики определения показателей, входящих в эту зависимость.

Известны несколько подходов к определению общей серы в углях — от классического гравиметрического метода Эшка до современных видов инструментального анализа [1]. Метод Эшка, предложенный в 1874 году, все еще широко используется в мировой практике. Он регламентируется ГОСТом[8]. Навеску угля сжигают путем спекания со смесью оксида магния и безводного углекислого натрия (соотношение 2:1 по массе) в окислительной атмосфере при температуре (800 ± 250) °С. Органическая масса топлива сгорает, и сера превращается в сульфаты натрия и магния. Их переводят в раствор. Сульфат-ион количественно осаждают в солянокислой среде хлористым барием в виде сернокислого бария $BaSO_4$. По массе $BaSO_4$ рассчитывают общее содержание серы. Недостатки этого подхода: большие затраты времени (не менее 6–7 часов) и возможность потери части органической серы при спекании со смесью [1]. В большинстве случаев метод применяется при возникновении разногласий как арбитражный. Общую серу в стандартных образцах топлива, предназначенных для градуировки анализаторов, определяют только методом Эшка.

Для практических целей рекомендуется регламентированный ГОСТом[9] ускоренный стандартный метод определения общей серы. Навеска топлива сжигается в потоке кислорода или воздуха в трубчатой печи при 1350 °С. Образуются зольный остаток и газообразные продукты сжигания, в состав которых входят оксиды серы (в основном $SO_2$) и хлора. Анализ выполняется за 40–60 минут. Этот метод использовали при определении

---

[8] *Правила ведення гірничих робіт на пластах, схильних до газодинамічних явищ.* Стандарт Мінвуглепрому України СОУ 10.1.00174088.011-2005. Київ: Мінвуглепром України; 2005. 224 с.

[9] ГОСТ 2059-95 (ИСО 351-96). *Топливо твердое минеральное. Метод определения общей серы сжиганием при высокой температуре.* Москва: Стандартинформ; 2008. 14 с. URL: https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294832/4294832840.pdf (дата обращения: 11.11.2023).

содержания общей серы для установления потребительских качеств углей, экспериментальные значения приведены в справочно-нормативных документах [2, 3]. Ускоренный метод определения общей серы рекомендуется для контроля за содержанием серы в малозольных топливах. Его нежелательно использовать при анализе высокозольных топлив со значительным содержанием соединений кальция. Из-за разнообразия состава минеральной массы и соединений серы нельзя быть полностью уверенным в том, что часть серы не останется в золе в виде $CaSO_4$. Как следствие, результаты получаются заниженными [1].

Для большинства шахтопластов после обогащения угля выход золы составляет менее 10 %, но этот показатель бывает и значительно выше (рис. 3).

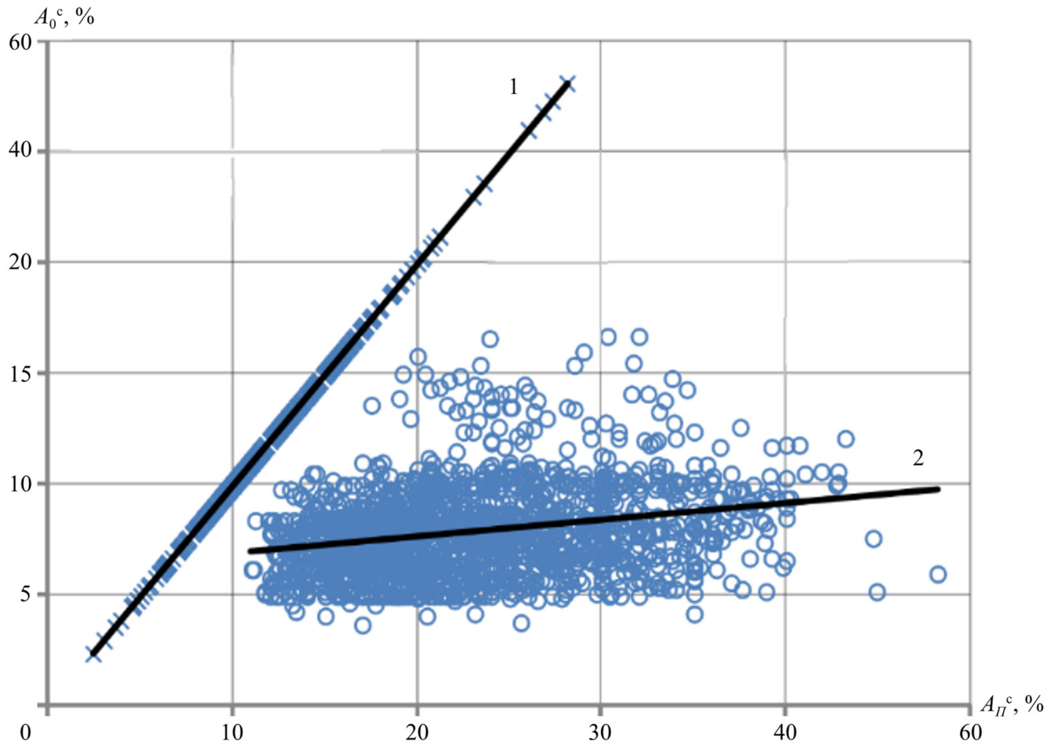



Рис. 3. Зависимость выхода золы из обогащенных проб угля ($A_о^c$) от выхода золы из пластовых проб ($A_п^c$) согласно экспериментальным данным [2, 3]

По этой причине даже после обогащения значительной части проб нет оснований считать все угли малозольными. Для 487 шахтопластов, согласно данным [2, 3], обогащение не проводилось и выход золы во многих случаях превышал 10 %, что также не позволяет относить угли этой совокупности шахтопластов к малозольным.

Соединения кальция есть в минеральных примесях углей всех шахтопластов. Об этом свидетельствует типизация состава зол (таблица 2), согласно которой содержание $CaO$ в общем случае может достигать 40 %.

Таблица 2

Типизация состава зол углей по данным [2] и [3]

| Типы зол углей | Пределы колебания состава, % | | | |
|---|---|---|---|---|
| | $Al_2O_3$ | $SiO_2$ | $Fe_2O_3$ | $CaO$ |
| Кремнистые | 8–30 | 40–70 | до 20 | до 20 |
| Глиноземные | 30–45 | 40–55 | до 20 | до 20 |
| Железистые | 10–20 | 30–55 | > 20 | до 20 |
| Известковые | 5–20 | 15–40 | 5–20 | 20–40 |

Одна из причин получения «диких» расчетных значений $S_н$ по уравнению (2) — занижение $S_t^d$ при определении ускоренным методом. Такой вывод обосновывается:

– анализом выхода золы из обогащенных и пластовых проб;

– возможным содержанием соединений кальция во всех типах зол.

Второй фактор получения отрицательных расчетных значений $S_н$ — завышение доли горючей части топлива с использованием в качестве множителя ($100–A_о^c$) в уравнении (2). Содержание общей серы $S_t^d$ относится как к органической части, так и к минеральной массе (ММ) топлива. По этой причине более логичным было бы

использовать в уравнении (2) вместо выхода золы $A_о^c$ значений ММ, которые для рассматриваемых шахтопластов экспериментально не определялись. Согласно известным эмпирическим зависимостям, значения ММ всегда превышают выход золы на сухое состояние. Учет такого превышения требует дополнительных (недостающих) сведений о гидратной влаге, выделяющемся диоксиде углерода при полном разложении карбонатов, пиритной и сульфатной сере. Для приблизительной оценки содержания минеральной массы иногда используют соотношение ММ ≈ 1,1 $A_о^c$ [1].

Анализ показал причины систематического занижения произведения $100 \cdot S_t^d$ и завышения разности $(100–A_о^c)$ $S_г$ при определении расчетных значений $S_н$ по уравнению (2).

Наличие отрицательных значений $S_н$ для совокупности из 802 шахтопластов (рис. 2 *а*) дает возможность оценить среднее занижение критерия $\overline{S_t^d - S_г}$, при котором получены «дикие» результаты:

$$\overline{S_t^d - S_г} = \frac{\sum_i^n \left(S_t^d - S_г\right)_i}{n} = \frac{-336,3}{802} = -0,42,\ \% \qquad (3)$$

Здесь $n$ = 802 — количество шахтопластов, для которых получены отрицательные значения $S_н$; $\Sigma\left(S_t^d - S_г\right)_i$ — сумма отрицательных значений $S_t^d – S_г$ для совокупности из $n$ = 802 шахтопластов.

Среднему отрицательному значению $\overline{S_t^d - S_г} = -\,0,42\%$ соответствует среднее отрицательное значение $\overline{S_н}$:

$$\overline{S_н} = \frac{\sum_i^n S_{нi}}{n} = \frac{-1682,18}{802} = -2,10,\ \%, \qquad (4)$$

где $\sum_i^n S_{нi}$ — сумма отрицательных расчетных значений $S_н$ для совокупности из $n$ = 802 шахтопластов.

Чтобы исключить получение отрицательных усредненных значений $S_н$, необходимо положение прямой 1 (рис. 2 *а*) скорректировать с учетом координат $\overline{S_t^d - S_г} = -0,42\ \%$ и $\overline{S_н} = -2,10\ \%$. Скорректированная прямая 1' должна проходить не ниже точки A' с координатами $\overline{S_t^d - S_г} = -0,42\ \%$ и $\overline{S_н} = +2,10\ \%$. Прямо пропорциональная зависимость $S_н$ от $(S_t^d – S_г)$ ($r$ = 0,91) указывает на то, что истинное положение скорректированной прямой 1' будет близко к ее параллельности с прямой 1. Использование в инженерных расчетах значений $S_н'$, определенных по уравнению 1' (рис. 2 *а*), гарантирует, как минимум, отсутствие их отрицательных усредненных значений.

Эмпирическое уравнение 1' получено на основании экспериментальных данных для 1827 шахтопластов. Из них для проб углей 1352 шахтопластов проводилось предварительное обогащение. Выход золы из пластовых проб углей остальных 475 шахтопластов был несколько ниже, поэтому для них обогащение не предусматривалось.

Предварительное обогащение существенно повлияло на выход золы по сравнению с необогащенными пробами (рис. 3). Следовало выяснить, как точность расчетного определения серы по уравнению (2) в условно негорючей части топлива зависит от обогащения. Для этого рассмотрели отдельные характерные совокупности шахтопластов. К одной совокупности из 1352 вариант отнесли шахтопласты, угли которых подвергались предварительному обогащению (рис. 2 *б*). До обогащения выход золы из пластовых проб составлял 11,0–48,2 %, а после — 3,7–16,7 % (рис. 3).

Во второй совокупности из 475 вариант рассмотрели шахтопласты, угли которых предварительно не обогащались (рис. 2 *в*), так как условно их относили к малозольным. Выход же золы из необогащенных углей этой совокупности шахтопластов колебался от 2,4 % до 28,1 % (рис. 3).

Выход золы для обеих рассматриваемых совокупностей шахтопластов во многих случаях значительно превышал 10 %. Диапазоны выхода составляли 3,7–16,7 % и 2,4–28,1 % соответственно. Это указывает на отсутствие в ряде случаев для обеих совокупностей обоснованного применения альтернативного ускоренного стандартного метода определения общей серы $S_t^d$ [9]. В результате по большинству рассматриваемых шахтопластов расчетные значения $S_t^d$ оказались заниженными. Вследствие этого получены и «дикие», рассчитанные по уравнению (2), значения $S_н$ соответственно для 558 и 244 шахтопластов обеих (2-й и 3-й) совокупностей (таблица 3).

Таблица 3

Сводные результаты определения расчетных значений $S_н$ согласно статистической обработке экспериментальных данных для разных совокупностей шахтопластов

| № | Количество шахтопластов | | | | Координаты точек A', % | | Эмпирические уравнения | Корреляция | | Диапазон изменения выхода золы, % | Пояснение |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $S_н<0$ | $S_t^d - S_г < 0$ | $S_t^d - S_г \geq 0$ | общее | $\overline{S_t^d - S_г}$ | $\overline{S_н}$ | | σ, % | $r$ | | |
| 1 | 1827 | 512 | 1315 | 802 | –0,42 | 2,1 | $S_н^* = 11{,}97\left(S_t^d - S_г\right) + 3{,}34$ | 0,91 | 2,67 | 2,4–48,2 | Вся совокупность шахтопластов с обогащенными и не обогащенными углями |
| | | | | | | | $S_н'^{**} = 11{,}97\left(S_t^d - S_г\right) + 7{,}12$ | – | – | | |
| 2 | 1352 | 491 | 861 | 558 | –0,42 | 2,69 | $S_н = 13{,}15\left(S_t^d - S_г\right) + 3{,}11$ | 0,94 | 2,43 | 3,7–16,7 | Обогащение проводилось |
| | | | | | | | $S_н' = 13{,}50\left(S_t^d - S_г\right) + 8{,}21$ | – | – | | |
| 3 | 475 | 21 | 454 | 244 | –0,41 | 0,71 | $S_н = 3{,}50\left(S_t^d - S_г\right) + 1{,}24$ | 0,56 | 1,5 | 2,4–28,1 | Шахтопласты с предположительно низкозольными углями |
| | | | | | | | $S_н' = 3{,}50\left(S_t^d - S_г\right) + 2{,}15$ | – | – | | |
| 4 | 1181 | 452 | 729 | 487 | –0,41 | 2,88 | $S_н = 13{,}84\left(S_t^d - S_г\right) + 3{,}00$ | 0,95 | 2,28 | 3,7–10 | Обогащенные угли с выходом золы менее 10 % |
| | | | | | | | $S_н' = 13{,}84\left(S_t^d - S_г\right) + 8{,}55$ | – | – | | |
| 5 | 171 | 39 | 132 | 71 | –0,50 | 1,36 | $S_н = 7{,}50\left(S_t^d - S_г\right) + 2{,}84$ | 0,92 | 1,47 | 10,1–16,7 | Выход золы после обогащения более 10 % |
| | | | | | | | $S_н' = 7{,}50\left(S_t^d - S_г\right) + 5{,}11$ | – | – | | |
| 6 | 149 | 13 | 136 | 81 | –0,26 | 1,13 | $S_н = 8{,}27\left(S_t^d - S_г\right) + 1{,}57$ | 0,79 | 1,61 | 2,4–10 | Выход золы из необогащенных проб менее 10 % |
| | | | | | | | $S_н' = 8{,}27\left(S_t^d - S_г\right) + 3{,}28$ | – | – | | |
| 7 | 326 | 8 | 318 | 163 | –0,48 | 0,5 | $S_н = 2{,}53\left(S_t^d - S_г\right) + 1{,}13$ | 0,56 | 1,04 | 10,1–28,1 | Выход золы из пластовых необогащенных проб более 10 % |
| | | | | | | | $S_н' = 2{,}53\left(S_t^d - S_г\right) + 1{,}71$ | – | – | | |

Примечания. В первом столбце № — номер совокупности пластов; * — зависимости согласно расчетным значениям $S_н$ по уравнению (2) и экспериментальным данным критерия ($S_t^d - S_г$); ** — скорректированные зависимости $S_н'$; σ — среднеквадратическое отклонение.

Средние отрицательные значения $S_t^d - S$ для шахтопластов 2-й и 3-й совокупностей были рассчитаны по уравнению (3). Они равнялись соответственно –0,42 % и –0,41 %. Это указывает на практически одинаковые средние погрешности занижения расчетного содержания общей серы альтернативным ускоренным методом для обеих совокупностей при расчете $S_{н}$ по уравнению (2). По указанным обстоятельствам ускоренный метод определения обшей серы и возможные занижения ее истинных значений не относятся к различиям между 2-й и 3-й совокупностями шахтопластов.

Логика уравнения (2) показывает, что разные расчетные значения $S_{н}$ 2-й и 3-й совокупностей можно получить только с учетом разного выхода золы из обогащенных и пластовых проб углей. Для удобства анализа потенциального влияния выхода золы из обогащенных и необогащенных проб углей уравнение (2) представили в виде слагаемых.

Для обогащенных проб (совокупность 2):

$$S_{н}^{o} = \frac{100}{A_{с}^{o}} \cdot S_t^d - \frac{100}{A_{с}^{o}} \cdot S_{г}^{o} + S_{г}^{o}, \%. \quad (5)$$

Для необогащенных пластовых проб (совокупность 3):

$$S_{н}^{п} = \frac{100}{A_{п}^{с}} \cdot S_t^d - \frac{100}{A_{п}^{с}} \cdot S_{г}^{п} + S_{г}^{п}, \%. \quad (6)$$

Сравнивая слагаемые уравнений (5) и (6), определили направленность их влияния на расчетные значения $S_{н}$. Первое слагаемое $\left(100/A_{с}^{o}\right) \cdot S_t^d$ уравнения (5) заведомо больше аналогичного слагаемого $\left(100/A_{п}^{с}\right) \cdot S_t^d$ уравнения (6). Это определили по бесспорному превышению выхода золы из пластовых проб по сравнению с выходом из обогащенных ($A_{п}^{с} > A_{о}^{с}$). Неравенство позволяет утверждать, что значения общей серы, определенные ускоренным альтернативным методом, будут в большей степени занижаться для пластовых проб. По этой причине значения $S_t^d$ уравнения (5), как минимум, не меньше, чем в (6).

Вторые слагаемые со знаком минус уравнений (5) и (6) $\left(\left(100/A_{о}^{с}\right) \cdot S_{г}^{о} \text{ и } \left(100/A_{п}^{с}\right) \cdot S_{г}^{п}\right)$ характеризуют увеличение доли содержания серы в горючей части топлива после обогащения углей по сравнению с содержанием в пластовых пробах до обогащения. Под воздействием процессов обогащения выход золы сокращается в несколько раз ($A_{о}^{c} < A_{п}^{c}$, рис. 3). В результате увеличивается доля горючей части топлива обогащенных углей $\left(100/A_{с}^{o}\right)$ по сравнению с ее долей в пластовых пробах $\left(100/A_{п}^{с}\right)$. Это, а также устойчивость соединений серы обусловливают рост относительного (процентного) содержания серы $S_{г}^{о}$ в горючей части топлива после обогащения. Эти значения всегда превышают процентное содержание серы в пластовых необогащенных пробах, т. е. соблюдается неравенство $S_{г} > S_{г}^{п}$. Отрицательные слагаемые уравнений (5) и (6) $\left(\left(100/A_{о}^{с}\right) \cdot S_{г}^{о} \text{ и } \left(100/A_{п}^{с}\right) \cdot S_{г}^{п}\right)$ при любом их соотношении составляют лишь некоторую часть от содержания серы в горючей массе. Вследствие этого суммарные значения второго и третьего слагаемых уравнений (5) и (6) будут положительными.

Рассмотрим неравенство слагаемых в (5) и (6): $S_{г}^{о} > S_{г}^{п}$ и $\left(100/A_{о}^{с}\right) \cdot S_t^d$ и $\left(100/A_{п}^{с}\right) \cdot S_t^d$. Это говорит о том, что обогащение ведет к процентному увеличению содержания серы в негорючей части топлива ($S_{н}$) и ее тесной, почти функциональной корреляционной зависимости ($r = 0,94$) от критерия $S_t^d – S_{г}$ (рис. 2 *б*). Сильная корреляция $S_{н}$ и $S_t^d – S_{г}$ для обогащенных углей шахтопластов 2-й совокупности обусловлена значительным принудительным сокращением содержания условно негорючих (минеральных) примесей. Об этом говорит сокращение диапазона выхода золы из пластовых необогащенных проб с 11,0–48,2 % до 3,7–16,7 % после обогащения. Для рассматриваемой совокупности шахтопластов в большинстве случаев (около 90 %) выход золы составлял менее 10 %, что указывает на незначительную долю содержания минеральных примесей в углях после обогащения. Обогащением в значительной степени объясняется приближение массовой доли горючей части топлива к органической массе. Корреляционная зависимость 1 (рис. 2 *б*) относится к незначительной доле (менее 10 %) сохранившихся после обогащения минеральных (условно негорючих) примесей. Относительно высокий коэффициент регрессии уравнения 1 (13,15) указывает на диспропорцию показателей:

– сокращения выхода золы после обогащения углей;

– содержания серы в сохранившейся части условно негорючих (минеральных) примесей [10].

Как видно из уравнения (5), высокая корреляционная зависимость $S_{н}$ от показателя $S_t^d – S_{г}$ для шахтопластов

2-й совокупности обеспечивалась относительным постоянством выхода золы $A_о^с$ для большинства шахтопластов в пределах 3,7–10,0 %. Это фактически исключает существенное влияние непредсказуемых колебаний доли условно негорючих (минеральных) примесей в более широких диапазонах. Значения $S_н^о$ для 2-й совокупности шахтопластов, рассчитанные по уравнению (5), определяются экспериментальными данными $S_t^d$ и $S_г^о$. Это подтвердили результаты статистической обработки (рис. 2 *б*). Влияние колебаний выхода золы $A_о^с$ после обогащения углей свелось до минимума, и расчетные значения $S_н^о$ в большей степени зависели от двух показателей — $S_t^d$ и $S_г^о$.

Такой устойчивой связи между $S_н$ и $(S_t^d – S_г)$ не наблюдается при отсутствии процессов обогащения (рис. 2 *в*). Это выразилось в более низком коэффициенте корреляции ($r = 0{,}56$) и снижении коэффициентов регрессии эмпирических уравнений 1 с 13,15 (рис. 2 *б*) до 3,50 (рис. 2 *в*).

При расчете значений $S_н^п$ по уравнению (6) для 3-й совокупности шахтопластов диапазон непредсказуемых колебаний значений выхода золы $A_п^с$ расширился до 2,4 %–28,1 %. Это значительно больше, чем при стабильном выходе золы из обогащенных проб углей 2-й совокупности. Отметим усиление влияния дополнительного фактора, связанного с существенными колебаниями выхода золы из пластовых проб в более широких интервалах. Это привело к ослаблению корреляционной зависимости 1 до значения $r = 0{,}56$ (рис. 2 *в*).

Подавляющее большинство углей 3-й совокупности шахтопластов по критерию $S_t^d – S_г < 0$ должно относиться к малозольным. Из 475 шахтопластов всей рассматриваемой совокупности для 454 (т. е. для 95,6 %) значения критерия были отрицательными. По отрицательным значениям критерия $S_t^d – S_г$ основное процентное содержание серы необходимо было условно отнести к горючей массе углей этих шахтопластов. Определение $S_н$ согласно уравнению (6) для 244 шахтопластов дало «дикие» значения. Для остальных 231 шахтопласта расчетные значения $S_н$ были положительными (210 вариант) или равнялись нулю (21 варианта). Исследование выявило примерно равное количество околонулевых расчетных значений $S_н$. Это подтверждает наличие систематических погрешностей экспериментально определенных параметров, входящих в (6). Доказательством служит также примерное равенство по абсолютной величине средних отрицательных (–0,71 %) и средних положительных (+0,80 %) расчетных значений $S_н$. Это дает возможность обоснованно вносить количественные корректировки в расчеты, чтобы исключить получение «диких» результатов.

Сравнение расчетных значений содержания серы в негорючей части топлива для 2-й и 3-й совокупностей демонстрирует значительное отличие исходных параметров показателей, которые использовались при определении $S_н$ и $S_н^п$ по уравнениям (5) и (6) соответственно. Основная разница обусловлена предварительным обогащением углей 2-й совокупности. Обогащение непропорционально изменило соотношение выхода золы и содержания серы в горючей части топлива. Исходные соотношения формировались в природных условиях и связаны с индивидуальной геологической историей образования каждого шахтопласта, а именно:

– последовательным накоплением осадков;

– погружением и преобразованием исходного вещества на предшествующих метаморфизму стадиях торфообразования и диагенеза.

В углях 3-й совокупности шахтопластов сохранились исходные сложившиеся природные соотношения между выходом золы из пластовых проб, содержанием общей серы и некоторой ее части в горючей массе топлива.

Обогащение углей 2-й совокупности шахтопластов и сокращение выхода золы (в большинстве случаев ниже 10 %) предопределили искусственную близость всей совокупности по содержанию минеральных (условно негорючих) примесей. В результате фактического устранения влияния выхода золы из обогащенных проб для большинства шахтопластов по уравнению (5) получены расчетные значения $S_н^п$, которые в значительной степени непосредственно связаны с критерием $(S_t^d – S_г)$. Это и предопределило их высокую корреляционную взаимозависимость (рис. 2 *б*).

Главное отличие углей 2-й и 3-й совокупностей шахтопластов — значения выхода золы из обогащенных и пластовых проб углей. Для детального представления о влиянии выхода золы из обогащенных и необогащенных проб углей на расчетные значения $S_н$ дополнительно рассмотрели четыре совокупности шахтопластов с углями разной степени глубины обогащения (рис. 4).

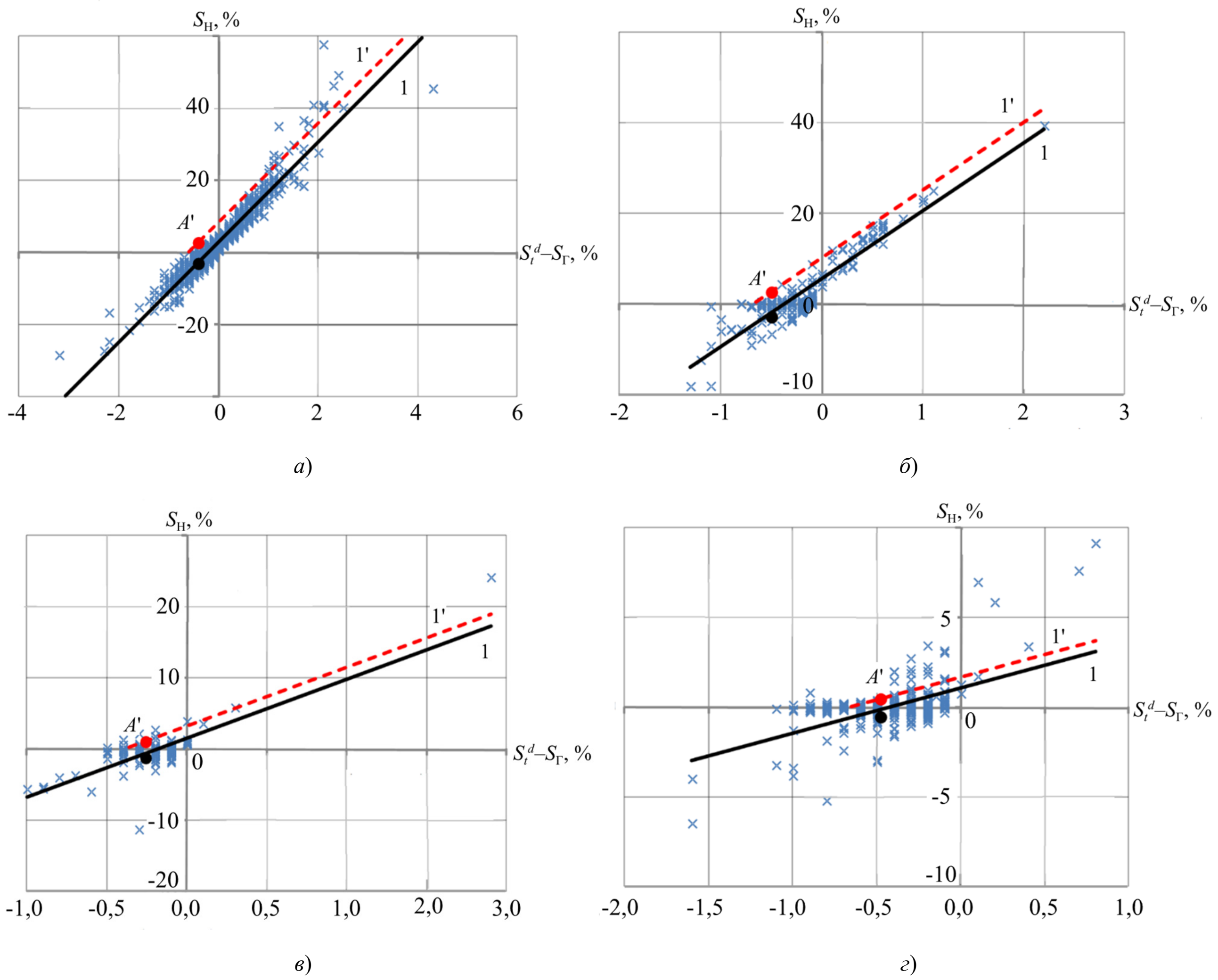



Рис. 4. Зависимость расчетных значений содержания серы ($S_н$) в условно негорючей части топлива от критерия ($S_t^d – S_г$) [2, 3]

По выходу золы из обогащенных проб шахтопласты разделили на две группы: менее 10 % и более 10 % (рис. 3). Рассмотрели соответствующие группам совокупности — 4-ю (рис. 4 *а*) и 5-ю (рис. 4 *б*).

Большинство шахтопластов (1181 % или 87,4 %) по выходу золы менее 10 % из обогащенных проб отнесли к 4-й совокупности. В 5-й совокупности шахтопластов с выходом золы более 10 % рассмотрели расчетные значения $S_н$ для 171 шахтопласта, что составило 12,6 % от общего количества шахтопластов (1352), угли которых обогащались.

Для обеих совокупностей шахтопластов после обогащения получены тесные прямо пропорциональные корреляционные зависимости расчетных значений $S_н$ от критерия $S_t^d – S_г$. Коэффициенты корреляции — 0,95 и 0,92 соответственно. Коэффициенты регрессии этих зависимостей (рис. 4 *а*, *б*) равнялись 13,84 и 7,50 соответственно. Почти двукратная разница между эмпирическими коэффициентами регрессии свидетельствует о существенных различиях между углями 4-й и 5-й совокупностей. Ее можно объяснить:

– количественным и качественным составом минеральных примесей в пластовых пробах;

– разной эффективностью обогащения.

Влияние указанных факторов требует отдельного детального исследования [11].

Аналогичные совокупности шахтопластов сформировали по выходу золы из пластовых (необогащенных) проб менее и более 10 %. Для 6-й совокупности из 149 шахтопластов установили зависимость $S_н$ от критерия $S_t^d – S_г$ при выходе золы из необогащенных (пластовых) проб менее 10 % (рис. 4 *в*). В 7-й совокупности из 326 шахтопластов рассмотрели аналогичные зависимости расчетных значений $S_н$ от критерия ($S_t^d – S_г$) при выходе золы более 10 % (рис. 4 *г*).

Полученные прямо пропорциональные эмпирические зависимости для 6-й и 7-й совокупностей шахтопластов с разным выходом золы из необогащенных (пластовых) проб значительно различаются. Отличия обусловлены как теснотой корреляционных связей, так и коэффициентами регрессии эмпирических уравнений.

Выход золы из необогащенных (пластовых) проб менее 10 % указывает на низкую зольность углей 6-й совокупности шахтопластов. В этом случае корреляционная связь довольно высока ($r = 0{,}79$). Для более зольных углей 7-й совокупности шахтопластов корреляция значительно слабее ($r = 0{,}56$).

Более чем в три раза различаются коэффициенты регрессии эмпирических уравнений 6-й и 7-й совокупности шахтопластов. Они соответственно равны 8,27 (рис. 4 *в*) и 2,53 (рис. 4 *г*).

Выявленные существенные отличия между эмпирическими зависимостями 6-й и 7-й совокупностей шахтопластов по тесноте корреляционных связей и коэффициентов регрессии указывают на разные особенности условий накопления серы в минеральной (условно негорючей) части топлива для углей с разным уровнем выхода золы.

Низкий уровень выхода золы (менее 10 %) свидетельствует о незначительном содержании минеральных примесей. Между расчетным содержанием серы в условно негорючей части и критерием ($S_t^d - S_г$) (рис. 4 *в*) фиксируется довольно высокий коэффициент корреляции ($r = 0{,}79$). Это значит, что сера формировалась параллельно в минеральных примесях и в органической массе на разных стадиях образования угля. Отсутствие такой тесной корреляции для высокозольных углей указывает на разные условия формирования содержания серы в минеральных примесях и в органической массе 7-й совокупности шахтопластов (рис. 4 *г*).

**Обсуждение и заключение.** Согласно эмпирическим уравнениям (рис. 4) попарно рассмотрели совокупности шахтопластов, которые при прочих равных условиях отличались по двум факторам (таблица 3):

– обогащались или не обогащались угли;

– выход золы из обогащенных или необогащенных углей был менее или более 10 %.

Обогащение существенно меняет соотношения между:

– органической массой и минеральными примесями;

– горючими и условно негорючими частями топлива.

По этой причине 1-я, 2-я, 4-я и 5-я совокупности шахтопластов и соответствующие им эмпирические уравнения не отражают истинное природное содержание серы в негорючих частях ископаемых углей. Их нельзя использовать для прогноза опасных свойств шахтопластов при ведении горных работ.

Содержание серы в условно негорючей массе необогащенных проб для 3-й и 7-й совокупностей занижается из-за наличия высокого выхода золы и применения альтернативного стандартного метода определения содержания общей серы. Область применения соответствующих этим совокупностям эмпирических уравнений ограничена шахтопластами с низкозольными углями и незначительным содержанием соединений кальция в минеральных примесях.

Наиболее достоверные результаты определения расчетного содержания серы в условно негорючей массе получены для 6-й совокупности шахтопластов. Практическое применение соответствующего эмпирического уравнения рекомендуется при прогнозе опасных свойств шахтопластов с выходом золы менее 10 %.

Можно улучшить предложенный метод определения серы в минеральных примесях и расширить область его применения. Для этого необходимо установить соотношения:

– содержания серы в органической и горючей массе углей;

– минеральных примесей и выхода золы (с определением ее химического состава).

Результаты таких исследований можно использовать для совершенствования нормативов по безопасному ведению горных работ с учетом содержания серы как в органической массе, так и в минеральных примесях ископаемых углей.

**Список литературы**

1. Авгушевич И.В, Сидорук Е.И., Броновец Т.М. *Стандартные методы испытания углей. Классификации углей.* Москва: Реклама мастер; 2019. 576 с. URL: https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-standmethodsoftestcoalsavg2019.pdf (дата обращения: 11.11.2023).

2. Двужильная Н.М., Егоркина В.М. *Справочник по качеству каменных углей и антрацитов Донецкого и Львовско-Волынского бассейнов.* Москва: Недра; 1972. 168 с. URL: https://drive.google.com/file/d/1URCq6AD_ArlW8cV0Y2X35FYSl4_LSD5A/view (дата обращения: 11.07.2023).

3. Коткин А.М., Ельяшевич М.Г. (ред.). *Справочник по качеству и обогатимости каменных углей и антрацитов Украинской ССР (Донбасс в границах УССР, Львовско-Волынский бассейн)*. Т. 1. Характеристика качества каменных углей и антрацитов Украинской ССР. Москва: Недра; 1965. 204 с.

4. Греков С.П., Пашковский П.С., Орликова В.П. Тепловой эффект окисления углей и эндогенная пожароопасность. *Уголь Украины.* 2014;(10):46–50.

5. Стадников Г.Л. *Самовозгорающиеся угли и породы, их геохимическая характеристика и методы опознавания.* Москва: Углетехиздат; 1956. 478 с.

6. Руднєв Є.С, Гальченко В.А., Філатьєва Е.М., Антощенко М.І. Сірка у викопному вугіллі як фактор прояву небезпечних властивостей шахтопластів. В: *Збірник наукових праць.* Вісник Криворізького національного університету; 2021. С. 21–28.

7. Греков С.П., Всякий А.А. Влияние содержания серы в углях на вероятность их самовозгорания. *Уголь Украины.* 2014;(4):18–21.

8. Руднєв Є.С, Антощенко М.І., Філатьєва Е.М., Романченко Ю.А. Про вплив мінеральних домішок на виявлення небезпечних властивостей вугільних шахтопластів. *Вісті Донецького гірничого інституту.* 2021;2(49):85–95. https://doi.org/10.31474/1999-981X-2021-2-85-95

9. Буковская М., Буковский П. Изменение свойств углепородного массива и возникновение опасных природных явлений при затоплении выработок закрытых угольных шахт. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых.* 2021;(5):56–70. https://doi.org/10.15372/FTPRPI20210506

10. Meng Wu, Jian Shen, Yunhu Qin, Yong Qin, Xiaoqing Wang, Shifei Zhu. Method of identifying total sulfur content in coal: geochemical and geophysical logging data from the Upper Paleozoic in North China. *ACS Omega.* 2022;7(49):45045–45056. https://doi.org/10.1021%2Facsomega.2c05459

11. Anubhav Shukla, Anup Krishna Prasad, Sameeksha Mishra, Arya Vinod, Atul K Varma. Rapid estimation of sulfur content in high-ash Indian coal using mid-infrared FTIR data. *Minerals.* 2023;13(5):634. https://doi.org/10.3390/min13050634

**References**

1. Avgushevich IV, Sidoruk EI, Bronovets TM. *Standartnye metody ispytaniya uglei. Klassifikatsii uglei.* Moscow: Reklama master; 2019. 576 p. URL: https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-standmethodsoftestcoalsavg2019.pdf (accessed: 11.11.2023). (In Russ.).

2. Dvuzhilnaya NM, Egorkina VM. *Spravochnik po kachestvu kamennykh uglei i antratsitov Donetskogo i L'vovsko-Volynskogo basseinov.* Moscow: Nedra; 1972. 168 p. URL: https://drive.google.com/file/d/1URCq6AD_ArlW8-cV0Y2X35FYSl4_LSD5A/view (accessed: 11.07.2023). (In Russ.).

3. Kotkin AM, Elyashevich MG. (ed.). *Spravochnik po kachestvu i obogatimosti kamennykh uglei i antratsitov Ukrainskoi SSR (Donbass v granitsakh USSR, L'vovsko-Volynskii bassein)*. Vol. 1. Kharakteristika kachestva kamennykh uglei i antratsitov Ukrainskoi SSR. Moscow: Nedra; 1965. 204 p. (In Russ.).

4. Grekov SP, Pashkovskii PS, Orlikova VP. Teplovoi effekt okisleniya uglei i endogennaya pozharoopasnost'. *Ugol' Ukrainy.* 2014;(10):46–50. (In Russ.).

5. Stadnikov GL. *Samovozgorayushchiesya ugli i porody, ikh geokhimicheskaya kharakteristika i metody opoznavaniya.* Moscow: Ugletekhizdat; 1956. 478 p. (In Russ.).

6. Rudniev YES, Halchenko VA, Filatieva EM, Antoshchenko MI. Cirka u vykopnomu vuhilli yak faktor proiavu nebezpechnykh vlastyvostei shakhtoplastiv. In: *Zbirnyk naukovykh prats. Visnyk Kryvorizkoho natsionalnoho universytetu*; 2021. P. 21–28. (In Ukr.)

7. Grekov SP, Vsyakii AA. Vliyanie soderzhaniya sery v uglyakh na veroyatnost' ikh samovozgoraniya. *Ugol' Ukrainy.* 2014;(4):18–21. (In Russ.).

8. Rudniev YES, Antoshchenko MI, Filatieva EM, Romanchenko YUA. Pro vplyv mineralnykh domishok na vyiavlennia nebezpechnykh vlastyvostei vuhilnykh shakhtoplastiv. *Visti Donetskoho hirnychoho instytutu.* 2021;2(49):85–95. https://doi.org/10.31474/1999-981X-2021-2-85-95

9. Bukowska M, Bukowski P. Changes of properties of carboniferous rock mass and the occurrence of some natural hazards in the conditions of flooding of roadways within abandoned coal mines. *Journal of Mining Sciences.* 2021;(5): 56–70. https://doi.org/10.15372/FTPRPI20210506 (In Russ.).

10. Meng Wu, Jian Shen, Yunhu Qin, Yong Qin, Xiaoqing Wang, Shifei Zhu. Method of identifying total sulfur content in coal: geochemical and geophysical logging data from the Upper Paleozoic in North China. *ACS Omega.* 2022;7(49):45045–45056. https://doi.org/10.1021%2Facsomega.2c05459

11. Anubhav Shukla, Anup Krishna Prasad, Sameeksha Mishra, Arya Vinod, Atul K Varma. Rapid estimation of sulfur content in high-ash Indian coal using mid-infrared FTIR data. *Minerals.* 2023;13(5):634. https://doi.org/10.3390/min13050634

**Поступила в редакцию** 29.11.2023
**Поступила после рецензирования** 18.12.2023
**Принята к публикации** 29.12.2023

*Об авторах*

**Наталья Викторовна Пронская,** ассистент кафедры маркшейдерии, геодезии и геологии Донбасского государственного технического университета (294204, РФ, г. Алчевск, пр. Ленина, 16), ORCID, doctressa@mail.ru

**Эльвира Николаевна Филатьева,** кандидат технических наук, доцент кафедры пожарной безопасности Луганского государственного университета имени Владимира Даля (291034, РФ, г. Луганск, квартал Молодежный, 20а), ORCID, Elafilatyeva@gmail.com

**Михаил Владимирович Филатьев,** доктор технических наук, профессор кафедры техносферной безопасности Луганского государственного университета имени Владимира Даля (291034, РФ, г. Луганск, квартал Молодежный, 20а), ORCID, Mfilatev@gmail.com

**Нина Владимировна Шашло,** кандидат экономических наук, начальник отдела ядерной программы управления трансформации образования, доцент кафедры медиатехнологии Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ResearcherID, ScopusID, SPIN-код: 8045-6232, ORCID, ninelllsss@gmail.com

*Заявленный вклад соавторов*

Н.В. Пронская, Э. Н. Филатьева — формирование основной концепции, цели и задачи исследования.

М.В. Филатьев — научное руководство, анализ результатов исследований, формулирование выводов.

Н.В. Шашло — проведение расчетов, подготовка текста и оформление статьи.

*Конфликт интересов:* авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

**Received** 29.11.2023
**Revised** 18.12.2023
**Accepted** 29.12.2023

*About the Authors:*

**Natalya V. Pronskaya,** Assistant of the Mine Surveying, Geodesy and Geology Department, Donbass State Technical University (16, Lenin Ave., Alchevsk, 294204, RF), ORCID, doctressa@mail.ru

**Elvira N. Filatieva,** Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Fire Safety Department, Lugansk Vladimir Dahl State University (20a, Molodezhny Block, Lugansk, 291034, RF), ORCID, Elafilatyeva@gmail.com

**Mikhail V. Filatiev,** Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Technosphere Safety Department, Lugansk Vladimir Dahl State University (20a, Molodezhny Block, Lugansk, 291034, RF), ORCID, Mfilatev@gmail.com

**Nina V. Shashlo,** Cand. Sci. (Economics), Head of the Nuclear Program Department, Education Transformation Department, Associate Professor of the Media Technology Department, Media Communications and Multimedia Technologies Faculty, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ResearcherID, ScopusID, SPIN-code: 8045-6232, ORCID, ninelllsss@gmail.com

*Claimed contributorship:*

NV Pronskaya, EN Filatieva: formulation of the basic concept, goals and objectives of the study.

MV Filatiev: academic advising, analysis of the research results, formulation of the conclusions.

NV Shashlo: calculations, preparation of the text and design of the article.

*Conflict of interest statement:* the authors do not have any conflict of interest.

*All authors have read and approved the final manuscript.*